



## Beschreibung

Die Erfindung bezieht sich auf einen automatisch leistungsgeregelten Hochfrequenzgenerator für die Hochfrequenz-Chirurgie entsprechend dem Oberbegriff des Anspruchs 1.

Hochfrequenzströme werden in der Chirurgie zum Schneiden von menschlichem Gewebe oder zum Koagulieren, d.h. Blutstillen angeschnittener Gefäße verwendet. Beim Schneiden wird eine nahezu kontinuierliche Hochfrequenzleistung zugeführt, während beim Koagulieren Hochfrequenzimpulse verwendet werden. Die Betriebsfrequenz des Hochfrequenzgenerators muß nach einer VDE-Vorschrift über 300 kHz liegen. Damit soll verhindert werden, daß beim Patienten Nerven- oder Muskelreizungen auftreten.

Ein Problem der Hochfrequenzchirurgie ist die richtige Leistungsdosierung des Hochfrequenzgenerators. Bei einer zu niedrig eingestellten Leistung kommt der Schneidvorgang zum Erliegen, oder es findet keine ausreichende Koagulation statt. Ist die Hochfrequenzleistung dagegen zu hoch eingestellt, entsteht zwischen der Chirurgiesonde und dem Gewebe ein kräftiger Lichtbogen. Dieser Lichtbogen verursacht zunächst eine starke Nekrotisierung des Gewebes, was den Heilungsprozeß beeinträchtigt. Ein zu stark ausgeprägter Lichtbogen hat aber noch weitere Nachteile. Der wesentlichste ist eine teilweise Gleichrichtung des Hochfrequenzstromes durch den Lichtbogen, was die Gefahr der Nerven- und Muskelreizung beim Patienten hervorruft. Bei Unterwasserschneiden, wie z.B. in der Urologie, wird durch einen starken Lichtbogen Knallgas erzeugt, was zu gefährlichen Explosionen führen kann. Beim Koagulieren kann sich schließlich durch einen auftretenden Lichtbogen plötzlich ein unerwarteter und gefährlicher Schneideffekt einstellen.

Ein weiteres Problem ist die Tatsache, daß die Belastung des Hochfrequenzgenerators nicht konstant ist, sondern sehr großen Änderungen unterworfen sein kann. Die Impedanz des Patientenstromkreises liegt etwa zwischen 50 Ohm und 5 kOhm, mit einer Häufung zwischen 200 und 1000 Ohm. Auch die Blindkomponente der Impedanz des Patientenstromkreises kann je nach der Führung der Verbindungsleitungen zwischen Hochfrequenzgenerator und Patienten sehr unterschiedlich sein.

Eine Vereinfachung der elektrotechnischen Verhältnisse ergibt sich aus der Tatsache, daß der Effekt des Schneidens oder Koagulierens nicht auf eine strenge Einhaltung der Frequenz angewiesen ist. In der Hochfrequenzchirurgie sind Frequenzen zwischen 300 kHz und 2 MHz üblich, ohne daß dabei in der Anwendung spürbare Unterschiede entstehen.

Dagegen entstehen weitere technische Probleme aus der Forderung nach einem hohen Wirkungsgrad. Bei einem im Operationssaal zu betreibenden Hochfrequenz-Chirurgiegerät ist z.B. kein Lüfter zur Kühlung erlaubt, weil mit dem Kühlluftstrom Bakterien aufgewirbelt werden könnten. Bei einer verfügbaren Hochfrequenzleistung von z.B. 400 W ist dann ein Wirkungsgrad des Hochfrequenz-Leistungsgenerators von mindestens 90% notwendig, wenn sich das Gerät nicht unzulässig erwärmen soll.

In der Deutschen Patentanmeldung P 36 04 823.2 ist daher ein Hochfrequenzgenerator mit automatischer Leistungsregelung für die Hochfrequenzchirurgie beschrieben, der mit verschiedenen Maßnahmen versucht, die geschilderten Probleme zu lösen. Dieser Hochfre-

quenzgenerator besteht aus einem Oszillator zur Erzeugung der Generatorfrequenz, einem Modulator zur Regelung der Ausgangsamplitude, einem Leistungsverstärker zur Erzeugung der notwendigen Hochfrequenzleistung, einem Ausgangsfilter zur Unterdrückung von anderen Frequenzen als der Generatorfrequenz und einer Harmonischen-Meßeinrichtung zur Messung der zur Generatorfrequenz harmonischen Frequenzen. Diese harmonischen Frequenzen entstehen durch die Nichtlinearität des Lichtbogens zwischen der Chirurgiesonde und dem Gewebe und sind ein direktes Maß für die Schlagweite des Lichtbogens. Das Auftreten des Lichtbogens und seine Schlagweite können zur Bestimmung des Schneide- und Koagulationszustandes herangezogen, bzw. zur automatischen Konstanthaltung des Schneidzustandes oder zur Vermeidung des Schneideffektes beim Koagulieren verwendet werden.

Die Frequenz des Oszillators ist mit elektronischen Mitteln verstellbar. Sie wird mit Hilfe einer Phasenmeßeinrichtung und eines Regelverstärkers (Phasenregelschleife) immer so nachgeregelt, daß die Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom am Ausgang des Leistungsverstärkers dem optimalen Betriebszustand des Leistungsverstärkers angepaßt ist, in der Regel also null Grad ist. In diesem Fall hat der Leistungsverstärker kleinste Verlustleistung, d.h. höchsten Wirkungsgrad. Die Frequenz des Hochfrequenzgenerators ist also nicht konstant, sondern orientiert sich an der momentanen Impedanz des Patientenstromkreises, also der Lastimpedanz des Hochfrequenzgenerators.

Die Harmonischen-Meßeinrichtung ist wegen der nicht konstanten Generatorfrequenz mit besonderen Maßnahmen versehen. Sie enthält einen phasengesteuerten Gleichrichter, der von der momentanen Frequenz des Oszillators gesteuert wird. Damit kann in jedem Moment eine Harmonische exakt ausgefiltert werden, ohne daß ein hoher Filteraufwand im Ausgangskreis des Hochfrequenzgenerators notwendig wäre. Das Meßergebnis der Harmonischen-Meßeinrichtung wird als Regelsignal für den Modulator verwendet. Dadurch wird die Ausgangsleistung des Hochfrequenzgenerators so geregelt, daß die Schlagweite des Lichtbogens zwischen Chirurgiesonde und Gewebe in jedem Moment einem vorgeschriebenen Wert entspricht.

Mit einem solchen Hochfrequenzgenerator können die geschilderten Probleme grundsätzlich gelöst werden. Durch die Anpassung der Frequenz an die Lastimpedanz wird dabei von der relativ großen Freiheit in der Wahl der Generatorfrequenz Gebrauch gemacht.

Ein Hochfrequenzgenerator nach dem Stand der Technik hat aber unter bestimmten Bedingungen noch gravierende Nachteile. Wenn die Lastimpedanz des Hochfrequenzgenerators sehr niedrig oder sehr hoch wird, kann die Phasenmeßeinrichtung für die Nachsteuerung der Generatorfrequenz Probleme machen. Bei sehr niedrigen Lastimpedanzen, z.B. beim Anschneiden in sehr blutreichem Gewebe, ist das Spannungssignal für die Phasenmeßeinrichtung sehr klein, bei sehr hohen Lastimpedanzen, z.B. beim Generatortest mit nicht angeschlossener Chirurgiesonde, das Stromsignal. In beiden Fällen kann das Ausgangssignal der Phasenmeßeinrichtung undefiniert sein, worauf der Hochfrequenzgenerator eine falsche Frequenz einstellt. Dies kann in beiden Fällen die Zerstörung der Verstärkerelemente im Leistungsverstärker bedeuten: Bei der niederohmigen Last durch Schaltvorgänge weitab vom Strom-Nulldurchgang, bei der hochohmigen Last durch Spannungs-Überschwinger.

Noch wesentlicher ist eine nachteilige Eigenart der Frequenzregelung mit der Phasenregelschleife. Die Phasenregelschleife muß aus Stabilitätsgründen Tiefpaßcharakter aufweisen. Damit ist die Regelgeschwindigkeit begrenzt. Bei sehr schnellen Wechseln der Lastimpedanz, z.B. bei einer plötzlichen Berührung des Gewebes aus der Luft heraus, kann die richtige Frequenz nur nach einer deutlichen Reaktionszeit eingestellt werden. Da die Grenzfrequenz der Phasenregelschleife mindestens eine Größenordnung unter der Generatorfrequenz liegen muß, vergehen viele Periodendauern der Generatorfrequenz, bis wieder die zur Lastimpedanz passende Frequenz eingestellt ist. Die Erfinder haben in der Praxis jedoch Vorgänge beobachtet, bei denen die Verstärkerelemente des Leistungsverstärkers bei leicht verstimmter Generatorfrequenz schon nach wenigen Periodendauern zerstört waren.

Der Erfindung liegt daher die Aufgabe zugrunde, einen automatisch leistungsgeregelten Hochfrequenzgenerator für die Hochfrequenz-Chirurgie zu schaffen, der diese Nachteile vermeidet.

Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß mit den in den Kennzeichen des Anspruchs 1 und der Unteransprüche vorgeschlagenen Maßnahmen gelöst.

Der Leistungsverstärker arbeitet im Schaltbetrieb. Dadurch kann grundsätzlich ein hoher Wirkungsgrad erzielt werden. Das Ausgangsfilter weist einen ungefähr auf die mittlere Betriebsfrequenz abgestimmten in Serie geschalteten Serienresonanzkreis und einen ungefähr auf die mittlere Betriebsfrequenz abgestimmten parallel geschalteten Parallelresonanzkreis auf, wobei der Serienresonanzkreis vom Leistungsverstärker aus gesehen das erste Filterelement darstellt.

Die Ansteuerung des Leistungsverstärkers erfolgt im Moment des Anschwingens von einem Hilfsoszillator.

Nach dem Anschwingen, d.h. wenn im Ausgangskreis des Leistungsverstärkers entweder ein von Null deutlich unterschiedlicher Strom fließt oder eine von Null deutlich unterschiedliche Spannung herrscht, wird die Ansteuerung des Leistungsverstärkers auf Selbsterregung, d.h. Rückkopplung aus dem Ausgangskreis des Leistungsverstärkers umgeschaltet. Dabei sind im Rückkopplungsbetrieb für die Ansteuerspannung des Leistungsverstärkers zwei verschiedene Möglichkeiten vorgesehen: Sie wird entweder über ein Wandlerglied und Impulsformerstufen aus dem den Serienresonanzkreis durchfließenden Strom gewonnen, wodurch Stromrückkopplung entsteht, wenn der Betrag der an den Hochfrequenzgenerator angeschlossenen Lastimpedanz einen charakteristischen, voreingestellten Wert unterschreitet. Oder sie wird über ein Wandlerglied und Impulsformerstufen aus der am Parallelresonanzkreis anliegenden Spannung gewonnen, wodurch Spannungsrückkopplung entsteht, wenn der Betrag der an den Hochfrequenzgenerator angeschlossenen Lastimpedanz einen charakteristischen, voreingestellten Wert überschreitet. Für diese Umschaltung ist ein elektronischer Schalter vorgesehen, der bei schwankenden Lastimpedanzen auch während des Betriebes die beschriebene Umschaltung zwischen Strom- und Spannungsrückkopplung vornimmt, wenn der Betrag der Lastimpedanz den charakteristischen, voreingestellten Wert über- oder unterschreitet.

Weiterhin ist der Hilfsoszillator so gestaltet, daß seine Frequenz mit elektronischen Mitteln verstellbar ist, wobei eine phasengesteuerte Schaltung vorhanden ist, die diese Frequenz während des Rückkopplungsbetriebes auf die Generatorfrequenz synchronisiert. Außerdem ist

eine Halteschaltung vorhanden, die die Synchronisation des Hilfsoszillators während der Betriebspausen des Hochfrequenzgenerators unterbindet und die Frequenz während der Betriebspausen und während des Anschwingens auf der letzten während des Rückkopplungsbetriebes eingestellten Frequenz hält.

Die Harmonischen-Meßeinrichtung enthält einen phasengesteuerten Gleichrichter, dessen Steuersignal aus der momentanen Frequenz des Hilfsoszillators abgeleitet ist und der eine der im Frequenzgemisch am Ausgang des Hochfrequenzgenerators enthaltene harmonische Frequenz gleichrichtet. Das Ausgangssignal der Harmonischen-Meßeinrichtung wird dem Modulator als Regelsignal zur Regelung der Ausgangsamplitude des Hochfrequenzgenerators zugeführt.

Der Serienresonanzkreis sorgt dafür, daß der Ausgangsstrom des Leistungsverstärkers nahezu rein sinusförmig ist. Durch die Rückkopplung ist die Ausgangsspannung und der Ausgangsstrom immer nahezu genau in Phase. Das bedeutet, daß die Verstärkerelemente des Leistungsverstärkers im Umschaltzeitpunkt nahezu stromlos sind. Dadurch entstehen kleinstmögliche Verluste im Leistungsverstärker.

Der Parallelresonanzkreis sorgt dafür, daß die Ausgangsspannung des Leistungsverstärkers nahezu rein sinusförmig ist. Die harmonischen Frequenzen, die aufgrund des Schaltbetriebs im Leistungsverstärker entstehen, werden sehr stark gedämpft, wodurch nahezu keine Beeinträchtigung für die Messung der im Lichtbogen erzeugten höheren Harmonischen entsteht.

Der Hochfrequenz-Leistungsgenerator nach der Erfindung arbeitet nur im Moment des Anschwingens mit Fremderregung durch den Hilfsoszillator. Der eigentliche Betrieb findet im Selbsterregungsmodus, d.h. mit Rückkopplung statt. Dabei werden Fehler im Frequenzabgleich des Serienresonanzkreises und des Parallelresonanzkreises oder Alterung der Blindelemente in den beiden Resonanzkreisen automatisch ausgeglichen. Auch Änderungen im Realteil und insbesondere im Imaginärteil der Lastimpedanz werden automatisch berücksichtigt. Die Frequenz stellt sich immer so ein, daß die Rückkopplungsbedingung erfüllt ist. Sie ist in der Regel die resultierende Mittenfrequenz des Ausgangsfilters inklusive Lastimpedanz. Frequenzfehler einer Fremdansteuerung können a priori nicht auftreten.

Die Rückkopplungsart ist bei einem Hochfrequenzgenerator nach der Erfindung aber nicht fest gewählt. Es wird vielmehr, je nach Größe der angeschlossenen Lastimpedanz, entweder Stromrückkopplung oder Spannungsrückkopplung gewählt. Bei niederohmigen Lastimpedanzen wird Stromrückkopplung verwendet. Durch die niederohmige Lastimpedanz ist der Parallelresonanzkreis sehr stark bedämpft und der Serienresonanzkreis ist das eigentlich frequenzbestimmende Glied. Es fließt ein hoher Strom durch den Serienresonanzkreis und die Blindleistung in ihm ist hoch. Dagegen ist die Spannung am Parallelresonanzkreis niedrig und die in ihm umgesetzte Blindleistung ist klein. In diesem Fall liefert die Stromrückkopplung den stabilsten Betrieb mit kleinstmöglicher Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung am Ausgang des Leistungsverstärkers.

Bei hochohmigen Lastimpedanzen wird dagegen Spannungsrückkopplung gewählt. Wegen der hochohmigen Lastimpedanz ist der Parallelresonanzkreis nur schwach bedämpft und stellt jetzt das eigentliche frequenzbestimmende Glied dar. Durch den Serienresonanzkreis fließt nur ein kleiner Strom und die Blindlei-

stung in ihm ist klein. Dagegen ist die Spannung am Parallelresonanzkreis hoch und die in ihm umgesetzte Blindleistung ist ebenfalls groß. In diesem Fall liefert die Spannungsrückkopplung den stabilsten Betrieb. Geringfügige Phasenverschiebungen zwischen Strom und Spannung am Ausgang des Leistungsverstärkers spielen keine sehr große Rolle, weil der Strom wegen der hochohmigen Last insgesamt klein ist.

Die Umschaltung auf Spannungsrückkopplung bei hochohmigen Lasten hat aber noch einen weiteren Vorteil, der in der Mehrdeutigkeit der Resonanz der Eingangsimpedanz des Ausgangsfilters bei hochohmigen Lastimpedanzen begründet ist. Dies wird später noch ausführlicher beschrieben.

Für die Rückkopplung wird immer nur Strom oder Spannung benötigt. Dabei wird immer die überwiegende Größe gewählt, bei niederohmiger Last also der Strom, bei hochohmiger Last die Spannung. Dadurch ist ein entscheidender Nachteil des Standes der Technik beseitigt, bei dem für die Phasenregelschleife immer beide Größen benötigt werden, wobei im hochohmigen und im niederohmigen Lastbereich immer eine der beiden Größen nach Null geht, und ein unsicheres Phasenmeßergebnis verursacht.

Ein besonderer Vorteil des Selbsterregungsprinzips in Verbindung mit der Umschaltung zwischen Strom- und Spannungsrückkopplung gegenüber dem Stand der Technik liegt darin, daß der Hochfrequenzgenerator auch bei schnell schwankenden Lastimpedanzen immer bei der aktuellen Mittenfrequenz des Ausgangsfilters inklusive Lastimpedanz arbeitet. Die frequenzregelnde Eigenschaft des Selbsterregungsmodos wirkt nämlich innerhalb weniger Halbperioden der Hochfrequenzschwingung. Dies äußert sich in einem besonders stabilen Betrieb mit kleinen Verlustleistungen in den Verstärkerelementen des Leistungsverstärkers, gleichbleibend hohem Wirkungsgrad und gleichbleibend hoher verfügbarer Leistung. Der stabile Betrieb erstreckt sich bis zum Last-Kurzschluß und Last-Leerlauf.

Der Hilfsoszillator hat eine doppelte Funktion. Beim Anschwingen des Hochfrequenzgenerators arbeitet er als Anschwinghilfe. Nach dem Umschalten auf Selbsterregung hat er zwar keine Funktion mehr für die Ansteuerung des Leistungsverstärkers, er wird aber als Generator für das Steuersignal der Harmonischen-Meßeinrichtung verwendet. In der Lichtbogen-Meßeinrichtung ist ein phasengesteuerter Gleichrichter enthalten, dessen Steuersignal phasenstarr zu der harmonischen Frequenz sein muß, die gleichgerichtet werden soll. Wollte man dieses Steuersignal aus der Ausgangsspannung oder dem Ausgangsstrom des Leistungsverstärkers gewinnen, so müßte man einen Frequenzvervielfacher verwenden. Frequenzvervielfacher sind aber technisch sehr viel aufwendiger als Frequenzteiler. Aus diesem Grund wird der Hilfsoszillator mit einer phasengesteuerten Schaltung auf die momentane Frequenz des Leistungsverstärkers synchronisiert und die Steuerspannung aus dem Hilfsoszillator abgeleitet. Wie später noch gezeigt wird, kann man mit sehr einfachen Mitteln die Steuerspannung für die Harmonischen-Meßeinrichtung aus dem Hilfsoszillator gewinnen, wenn man z.B. einen internen Oszillator auf der  $n$ -fachen Harmonischen schwingen läßt und die Steuerspannung für den Leistungsverstärker mit einem  $n:1$ -Frequenzteiler gewinnt.

Natürlich tritt auch hier die endliche Regelgeschwindigkeit einer Phasenregelschleife auf. Da der Regelvorgang für den Lichtbogen aber um etwa zwei Größen-

ordnungen langsamer ablaufen kann als die Frequenznachregelung für den Leistungsverstärker, bringt dieser Effekt für die Harmonischen-Meßeinrichtung keine Nachteile.

In der Hochfrequenzchirurgie werden die Hochfrequenzgeneratoren intermittierend betrieben. Der Hochfrequenz-Chirurgiegenerator ist als Gerät zwar während der ganzen Operation eingeschaltet, Hochfrequenzleistung soll er aber immer nur kurzzeitig zum Schneiden oder Koagulieren abgeben. Das bedeutet, daß alle Hilfsspannungen des Gerätes zwar über einen großen Zeitraum zur Verfügung stehen, der eigentliche Hochfrequenzgenerator aber immer nur durch Betätigen eines Schalters vorübergehend eingeschaltet wird. Bei den folgenden Ausführungen ist deshalb zwischen zwei Arten von "Einschalten" zu unterscheiden. Zunächst muß das gesamte Gerät mit allen Hilfsspannungen und evtl. vorhandenen peripheren Funktionen mit Hilfe eines Netzschalters in Betrieb genommen werden. Der in dem Gerät enthaltene eigentliche Hochfrequenzgenerator wird erst danach mit Hilfe eines Fuß- oder Handschalters aktiviert, wenn aktuell geschnitten oder koaguliert wird. Dabei wird der Hochfrequenzgenerator nicht durchgehend eingeschaltet, sondern intermittierend. Die weiteren Erklärungen über die Anschwinghilfe beziehen sich immer auf das Aktivieren des Hochfrequenzgenerators, nachdem das Gesamtgerät bereits eingeschaltet war und im allgemeinen bereits frühere Aktivierungen vorausgegangen waren.

Bei jedem Einschalten des Hochfrequenzgenerators muß ein Anschwingvorgang ausgelöst werden. Der Hilfsoszillator, der als Anschwinghilfe dient, muß den Leistungsverstärker so ansteuern, daß die Rückkopplungsschaltung dem Ausgangskreis genügend große Ströme oder Spannungen auf der Betriebsfrequenz entnehmen kann, um die Selbsterregung aufrecht zu erhalten.

Ein besonderes schnelles Anschwingen erhält man, wenn die Frequenz des Hilfsoszillators möglichst genau der Momentanfrequenz nach Umschaltung auf Selbsterregung entspricht. Der Hilfsoszillator wird daher von der Phasenregelschaltung über eine Halteschaltung (Sample-and-Hold) so angesteuert, daß er nur dann, wenn der eigentliche Hochfrequenzgenerator schwingt, d.h. mit Spannungs- oder Stromrückkopplung arbeitet, auf die momentane Betriebsfrequenz des Hochfrequenzgenerators synchronisiert wird. Diese Schaltung sorgt dafür, daß der Hilfsoszillator in den Arbeitspausen des Hochfrequenzgenerators auf der zuletzt eingestellten Frequenz weiterschwingt. Bei einer erneuten Aktivierung des Hochfrequenzgenerators gibt dann der Hilfsoszillator die letzte aktuelle Frequenz des Hochfrequenzgenerators als Anschwinghilfe an den Leistungsverstärker ab. Diese Frequenz hat den wahrscheinlichsten Wert der Frequenz, mit der der Hochfrequenzgenerator nach dem Umschalten auf Selbsterregung weiterschwingen wird.

Als Kriterium für die Umschaltung zwischen Strom- und Spannungsrückkopplung wird der Betrag der angeschlossenen Lastimpedanz verwendet. Ein charakteristischer Wert  $R_c$  für die Lastimpedanz, bei dem die Umschaltung zweckmäßigerweise erfolgen soll, kann für jeden nach der Erfindung aufgebauten Hochfrequenzgenerator z.B. experimentell bestimmt werden. Dabei können getrennt die Bereiche der Lastimpedanz ermittelt werden, in denen jeweils Stromrückkopplung oder Spannungsrückkopplung den stabilsten Betrieb ergeben. Als charakteristische Impedanz kann dann ein zwi-

schen den Stabilitätsgrenzen liegender Wert genommen werden.

Die Erfinder haben herausgefunden, daß Stromrückkopplung gewählt werden muß, wenn die Blindleistung im Serienresonanzkreis wesentlich größer ist als die Blindleistung im Parallelresonanzkreis. Umgekehrt muß Spannungsrückkopplung gewählt werden, wenn die Blindleistung im Parallelresonanzkreis wesentlich größer ist als im Serienresonanzkreis. Die Verteilung der Blindleistung auf die beiden Resonanzkreise hängt aber vom aktuellen Wert der Lastimpedanz ab. Als zweckmäßige Umschaltgrenze hat sich dabei die Lastimpedanz herausgestellt, bei der die Blindleistungen in beiden Schwingkreisen gerade gleich sind.

In einer vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung wird der charakteristische Wert der Lastimpedanz, bei dessen Unter- oder Überschreitung auf Strom- oder Spannungsrückkopplung umgeschaltet wird, daher so gewählt, daß er ungefähr der Gleichung

$$R_c = \sqrt{L_s C_p}$$

entspricht, wenn  $L_s$  die Induktivität des Serienresonanzkreises und  $C_p$  die Kapazität des Parallelresonanzkreises ist. Bei dieser charakteristischen Impedanz sind die Blindleistungen in beiden Schwingkreisen gerade gleich.

In vielen Anwendungsfällen der Hochfrequenzchirurgie stimmt das mittlere Impedanzniveau des Patientenstromkreises nicht mit den Betriebsdaten der Verstärkerelemente im Leistungsverstärker des Hochfrequenzgenerators überein. In diesen Fällen kann die Spule des Parallelresonanzkreises in bekannter Weise als Übertrager ausgebildet sein. Mit einem solchen Übertrager kann z.B. die Impedanz des Patientenstromkreises an Verstärkerelemente mit hohen zulässigen Spitzenströmen aber kleiner Spannungsfestigkeit angepaßt werden. In einer weiteren Ausgestaltung der Erfindung ist daher die Induktivität des Parallelresonanzkreises als Übertrager ausgebildet, wobei die Kapazität des Parallelkreises der Primärseite, d.h. der dem Leistungsverstärker zugewandten Seite dieses Übertragers parallel geschaltet ist. Damit die Rückkopplung erfindungsgemäß wieder über den Zweig mit der größeren Blindleistung erfolgt, muß dabei die Umschaltung zwischen Spannungs- oder Stromrückkopplung bei einem charakteristischen Wert der Lastimpedanz von ungefähr

$$R_c = \bar{u}^2 \cdot \sqrt{L_s C_p}$$

erfolgen, wenn  $\bar{u}$  das Spannungs-Übersetzungsverhältnis des Übertragers ist.

In manchen Fällen kann es zusätzlich erwünscht sein, daß die Kapazität des Parallelresonanzkreises parallel zur Sekundärwicklung des Übertragers liegt. Dies kann z.B. der Fall sein, wenn die Ausgangsimpedanz des Hochfrequenzgenerators bei den zur Generatorfrequenz harmonischen Frequenzen asymptotisch nach Null gehen soll, was bei der zuvor beschriebenen Anordnung wegen der unvermeidlichen Streuinduktivität des Übertragers nicht gegeben ist. In einer weiteren Ausgestaltung der Erfindung wird daher die Induktivität des Parallelresonanzkreises als Übertrager ausgebildet, und die Kapazität des Parallelkreises der Sekundärseite dieses Übertragers parallel geschaltet. In diesem Fall erfolgt die Umschaltung der Rückkopplung auf Spannungs- oder Stromrückkopplung dann, wenn die Lastimpedanz einen charakteristischen Wert über- oder unterschreitet der ungefähr der Gleichung

$$R_c = \bar{u} \cdot \sqrt{L_s C_p}$$

entspricht, wenn  $\bar{u}$  das Übersetzungsverhältnis des Übertragers ist.

Zur Einstellung der richtigen Rückkopplungsart muß die momentan wirksame Lastimpedanz wenigstens näherungsweise bekannt sein und mit dem charakteristischen Wert, bei dem eine Umschaltung erfolgen soll, verglichen werden. In einer Ausgestaltung der Erfindung ist dazu eine Meßanordnung zur Erfassung der Ausgangsspannung des Hochfrequenzgenerators oder einer dazu proportionalen Größe und eine Meßanordnung zur Erfassung des Ausgangsstromes des Hochfrequenzgenerators oder einer dazu proportionalen Größe vorhanden. Die Meßfaktoren der beiden Meßanordnungen sind dabei so voreingestellt, daß ihre Ausgangssignale ungefähr dann gleich sind, wenn die an den Hochfrequenzgenerator angeschlossene Impedanz den charakteristischen Wert hat. Außerdem ist eine Komparatorschaltung vorhanden, die die Ausgangssignale der beiden vorher beschriebenen Meßanordnungen miteinander vergleicht. Das Ausgangssignal dieser Komparatorschaltung springt dann um, wenn die Lastimpedanz entweder größer oder kleiner als der beschriebene charakteristische Wert wird und kann daher für die Umschaltung zwischen Spannungs- und Stromrückkopplung im Rückkopplungszweig des Hochfrequenzgenerators verwendet werden.

Ein Hochfrequenzgenerator nach der Erfindung verwendet einen Leistungsverstärker, der im Schaltbetrieb arbeitet. Solche Leistungsverstärker haben eine sehr niedrige Quellimpedanz. Ihre Ausgangsspannung ist daher über sehr weite Bereiche der Lastimpedanz nahezu konstant. Eine weitere Eigenart von Schaltverstärkern ist die Tatsache, daß die Hochfrequenz-Ausgangsspannung proportional zur Betriebsgleichspannung des Leistungsverstärkers ist. Diese Eigenschaft wird in einer Ausgestaltung der Erfindung genutzt. Dabei ist die Meßanordnung zur Erfassung der Ausgangsspannung des Hochfrequenzgenerators so gestaltet, daß sie eine zur Ausgangsspannung proportionale Größe durch Messung der Versorgungsgleichspannung des Leistungsverstärkers erfaßt.

In vielen Anwendungsfällen der Hochfrequenzchirurgie arbeitet der Hochfrequenzgenerator mit annähernd konstanter Ausgangsspannung. In solchen Fällen kann bei der Bestimmung der momentanen Lastimpedanz auf die Messung der Ausgangsspannung verzichtet werden. In einer weiteren Ausgestaltung der Erfindung ist daher zur Bestimmung der Lastimpedanz nur eine Meßanordnung zur Erfassung des Ausgangsstromes des Hochfrequenzgenerators oder einer dazu proportionalen Größe vorhanden. Außerdem ist eine Komparatorschaltung vorhanden, die das Ausgangssignal dieser Meßanordnung mit einem Sollwert vergleicht, der so gewählt ist, daß er dem Ausgangssignal der Meßanordnung im Fall der charakteristischen Lastimpedanz gleich ist. Das Ausgangssignal der Komparatorschaltung springt dann wieder um, wenn die Lastimpedanz den charakteristischen Wert über- oder unterschreitet und wird daher zur Umschaltung zwischen Spannungs- und Stromrückkopplung im Rückkopplungszweig des Hochfrequenzgenerators verwendet.

Die Erfinder haben bei Messungen an mehreren nach der Erfindung aufgebauten Hochfrequenzgeneratoren festgestellt, daß eine exakte Einhaltung des charakteristischen Impedanzwertes zur Umschaltung zwischen Strom- und Spannungsrückkopplung nicht notwendig



ist, sondern gewisse Abweichungen zulässig sind. Um ein zu häufiges Umschalten bei einer Lastimpedanz zu vermeiden, deren Wert zufällig um den charakteristischen Wert herum schwankt, wird in einer weiteren Ausgestaltung der Erfindung zur Steuerung des Umschaltvorganges der Rückkopplung eine Komparator-schaltung verwendet, die eine Hysterese aufweist.

Der Hilfsoszillator hat seine Hauptfunktion in der Bereitstellung des Steuersignals für den phasengesteuerten Gleichrichter in der Harmonischen-Meßeinrichtung. Darüber hinaus dient er bei jeder Aktivierung des Hochfrequenzgenerators als Anschwinghilfe. Dazu wird er nach der ersten Aktivierung auf die jeweils aktuelle Frequenz des Hochfrequenzgenerators synchronisiert. Damit er auch bei der ersten Aktivierung eine sinnvolle Starthilfe geben kann, ist der Hilfsoszillator in einer Ausgestaltung der Erfindung so dimensioniert, daß er bis zur ersten Aktivierung des Hochfrequenzgenerators eine Frequenz abgibt, die der mittleren Betriebsfrequenz des Hochfrequenzgenerators entspricht.

Wie bereits mehrfach beschrieben wurde, muß die Harmonischen-Meßeinrichtung mit einer Steuerspannung beaufschlagt werden, die die gleichzurichtende harmonische Frequenz besitzt. Diese Steuerspannung kann besonders einfach gewonnen werden, wenn der Hilfsoszillator einen internen Oszillator verwendet, der auf der  $n$ -fachen Generatorfrequenz schwingt, wenn  $n$  die Ordnungszahl der gleichzurichtenden Harmonischen ist. Für die Anschwinghilfe und den Frequenzvergleich in der Phasenregelschaltung enthält der Hilfsoszillator dann einen  $n:1$ -Frequenzteiler.

Der Lichtbogen zwischen Chirurgiesonde und Gewebe ist insbesondere bei automatisch leistungsgeregelten Hochfrequenzgeneratoren nahezu symmetrisch. Er erzeugt daher vorwiegend ungeradzahlige harmonische Frequenzen. Die erzeugten Amplituden der harmonischen Frequenzen nehmen mit der Ordnungszahl ab. Aus diesem Grund wird in einer Ausgestaltung der Erfindung ein Hilfsoszillator verwendet, der einen internen Hilfsoszillator mit einer Schwingfrequenz aufweist, die der dreifachen Generatorfrequenz entspricht.

Zur weiteren Verdeutlichung der Erfindung sind noch Zeichnungen beigelegt. Es zeigen:

Fig. 1 Vereinfachtes Blockschaltbild eines automatisch leistungsgeregelten Hochfrequenzgenerators nach der Erfindung.

Fig. 2 Blockschaltbild eines automatisch leistungsgeregelten Hochfrequenzgenerators mit ausführlicherer Darstellung der Bestandteile der Erfindung.

Fig. 3 Ortskurven der vom Leistungsverstärker gesehenen Eingangsimpedanz des Ausgangsfilters für verschiedene Werte eines reellen Lastwiderstandes  $R_{Last}$ .

In Fig. 1 ist das vereinfachte Blockschaltbild eines Hochfrequenzgenerators nach der Erfindung dargestellt. Im Leistungsverstärker 1 wird, nach entsprechender Ansteuerung über den Steuereingang  $E$ , die notwendige Hochfrequenzleistung erzeugt.  $U_1$  ist die komplexe Amplitude der Grundwelle der Ausgangsspannung und  $I_1$  die komplexe Amplitude der Grundwelle des Ausgangsstromes. Mit Hilfe des Modulators 2 kann diese Hochfrequenzleistung geregelt werden. Da der Leistungsverstärker 1 als Schaltverstärker arbeitet, kann seine Hochfrequenz-Ausgangsleistung mit einer Veränderung der wirksamen Betriebsspannung geregelt werden. In dem gezeichneten Beispiel arbeitet der Modulator daher mit einer Veränderung der Betriebsspannung  $U_B$ .

Im Moment des Anschwingens wird der Leistungs-

verstärker 1 von einem Hilfsgenerator 3 über einen Schalter 4 fremd angesteuert. Wegen der notwendigen Umschaltgeschwindigkeit wird dieser Schalter 4 in der Regel ein elektronischer Schalter sein.

Die Filterelemente Serienkreis, Parallelkreis und ein eventuell vorhandener Übertrager, sowie die Auskopp-  
lung von Ausgangsstrom und Ausgangsspannung des  
Leistungsverstärkers sind in dem Koppelfilter 5 zusam-  
mengefaßt. Dem Koppelfilter 5 werden zwei Signale  
entnommen, die aus dem Ausgangsstrom  $I_1$  bzw. der  
Ausgangsspannung  $U_1$  des Leistungsverstärkers abge-  
leitet sind.

Das ODER-Glied 6 stellt nun fest, ob entweder die  
Ausgangsspannung oder der Ausgangsstrom des Lei-  
stungsverstärkers deutlich von Null abweichen, d.h. ob  
der Anschwingvorgang eingeleitet ist. Sobald dies der  
Fall ist, wird der Schalter 4 vom ODER-Glied 6 umge-  
schaltet, d.h. die Ansteuerung des Leistungsverstärkers  
von Fremdansteuerung auf Selbsterregung geändert.  
Als Rückkopplungsspannung wird dabei vom Schalter 7  
entweder das von der Ausgangsspannung  $U_1$  oder das  
vom Ausgangsstrom  $I_1$  des Leistungsverstärkers 1 ab-  
geleitete Signal ausgewählt, je nachdem ob der momen-  
tante Wert der Lastimpedanz  $Z_{Last}$  größer oder kleiner als  
der charakteristische Widerstand  $R_c$  ist. Die Umschal-  
tung des Schalters 7 wird in diesem Beispiel mit Hilfe  
des Impedanzindikators 8 vorgenommen, der aus den  
beiden dem Koppelfilter entnommenen Signalen fest-  
stellt, welche Bedingung die momentane Lastimpedanz  
erfüllt. Auch der Schalter 7 wird in der Regel ein elek-  
tronischer Schalter sein.

Im Ausgangskreis des Leistungsverstärkers 1 ist wei-  
terhin ein Koppellement 9 enthalten, mit dem aus dem  
Ausgangskreis eine oder mehrere der harmonischen  
Frequenzen entnommen werden, die von einem eventu-  
ell an der Chirurgiesonde brennenden Lichtbogen er-  
zeugt werden. Eine dieser Frequenzen wird von dem  
phasengesteuerten Gleichrichter 10 in ein Steuersignal  
für den Modulator 2 umgewandelt. Dazu wird der pha-  
sengesteuerte Gleichrichter 10 noch mit einer Steuer-  
spannung beaufschlagt, die dem Hilfsoszillator 3 ent-  
nommen wird. Der Hilfsoszillator 3 besteht dafür aus  
einem Oszillator 11, der auf der  $n$ -fachen Betriebsfre-  
quenz schwingt, und einem  $n:1$ -Frequenzteiler 12, an  
dessen Ausgang die Betriebsfrequenz entsteht. Die  
Steuerspannung für den phasengesteuerten Gleichrich-  
ter 10 wird dabei dem Oszillator 11 entnommen.

Die Grundfrequenz des Oszillators 11 und damit der  
Teilungsfaktor  $n$  des Frequenzteilers 12 werden so ge-  
wählt, daß  $n$  die gewünschte Ordnungszahl der gleichzu-  
richtenden, vom Lichtbogen erzeugten harmonischen  
Frequenz ist. In der Praxis wird  $n$  vorzugsweise den  
Wert 3 haben, da die dritte Harmonische in der Regel  
die größte Amplitude aller vom Lichtbogen erzeugten  
harmonischen Frequenzen aufweist.

Das Steuersignal des phasengesteuerten Gleichrich-  
ters 10 muß allerdings starr mit der momentanen Be-  
triebsfrequenz des Leistungsverstärkers 1 verknüpft  
sein. Aus diesem Grund ist eine Phasenregelschleife  
vorgesehen, die aus dem phasengesteuerten Gleichrich-  
ter 13 und dem Halteverstärker ("Sample-and-Hold  
Verstärker") 14 besteht. Mit dieser Phasenregelschleife  
wird im gezeichneten Beispiel das Ausgangssignal des  
Frequenzteilers 12 verglichen und der Oszillator 11 so  
nachgesteuert, daß die beiden vom phasengesteuerten  
Gleichrichter 13 verglichenen Signale frequenz- und  
phasenstarr zueinander sind. Damit ist auch das Steuer-  
signal des phasengesteuerten Gleichrichters 10 fre-

quenz- und phasenstarr zur gleichzurichtenden Harmonischen.

Der Halteverstärker 14 schaltet das Phasenregelsignal nur dann auf den Oszillator 11 durch, wenn der Hochfrequenzgenerator im Selbsterregungsmodus arbeitet. Dies wird mit dem Steuersignal aus dem ODER-Glied 6 bewirkt.

In Fig. 2 ist ein etwas ausführlicheres Blockschaltbild eines automatisch leistungsgeregelten Hochfrequenzgenerators nach der Erfindung dargestellt. In diesem Blockschaltbild ist gezeigt, in welcher Form das an den Ausgang des Leistungsverstärkers 1 angeschlossene Ausgangsfilter aufgebaut ist. Es enthält einen in Serie geschalteten Serienresonanzkreis, der aus  $L_s$  und  $C_s$  besteht, und einen parallel geschalteten Parallelresonanzkreis, der aus  $C_p$  und  $L_p$  besteht. Am Ausgang des Filters ist die Lastimpedanz  $Z_{Last}$  über ein Koppelglied 9 angeschlossen. Dem Koppelglied 9 können in der oben beschriebenen Weise die vom Lichtbogen an der Chirurgiesonde erzeugten harmonischen Frequenzen entnommen werden.

In diesem Beispiel sind auch etwas ausführlicher die Möglichkeiten für die Gewinnung der Rückkopplungssignale und der Schaltsignale gezeigt. In Serie zum Serienresonanzkreis  $C_s/L_s$  liegt in diesem Ausführungsbeispiel ein Wanderglied zur Erzeugung einer geeigneten Spannung für die Stromrückkopplung, das in diesem Beispiel aus einem Stromwandler 15 und einem Verstärker 16 besteht. In diesem Zweig sind aber auch andere Schaltungsvarianten möglich, wie z.B. ein kleiner Serienwiderstand an Stelle des Stromwandlers im Ausgangsstromkreis des Leistungsverstärkers 1. Parallel zum Parallelresonanzkreis  $C_p/L_p$  liegt ein Wanderglied zur Erzeugung einer geeigneten Spannung für die Spannungsrückkopplung, das in diesem Beispiel aus dem Verstärker 17 besteht. Die Verstärker 16 und 17 weisen die im Blockschaltbild angegebenen Verstärkungen  $v_{11}$  und  $v_{12}$  auf, die so eingestellt sind, daß sich später eine passende Ansteuerspannung für den Leistungsverstärker ergibt. Wegen der hohen Ausgangsspannung des Leistungsverstärkers 1 wird die Verstärkung des im Spannungsrückkopplungszweiges liegenden Verstärkers 17 in der Regel  $v_{12} < 1$  sein.

Die Ausgangsspannungen der beiden Verstärker 16 und 17 werden dem elektronischen Umschalter 7 zugeführt, von dem sie entsprechend der momentanen Lastimpedanz für die jeweilige Rückkopplungsart ausgewählt werden.

Der Hochfrequenzgenerator wird in diesem Beispiel dadurch eingeschaltet, daß dem Leistungsverstärker 1 über den Schalter 18 und den Modulator 2 die Betriebsspannung  $U_B$  zugeführt wird. Dies wird mit Hilfe eines Fuß- oder Fingerschalters entweder im Betrieb "Schneiden" oder "Koagulieren" sein, wozu eine entsprechende Aktivierungsschaltung 19 vorgesehen ist. Es wird davon ausgegangen, daß das gesamte Hochfrequenzgerät mit den eventuell vorhandenen peripheren Einrichtungen und den Hilfsspannungen zu diesem Zeitpunkt bereits eingeschaltet war. Durch das Betätigen des Schalters 18 wird dann die Abgabe von Hochfrequenzleistung gestartet. In diesem Augenblick muß also das Anschwingen des Hochfrequenzgenerators initiiert werden. Dazu ist der Hilfsoszillator 3 über den elektronischen Schalter 4 und die Impulsformer- bzw. Vorverstärker-Stufe 20 an den Eingang  $E$  des Leistungsverstärkers 1 geschaltet. Der Hilfsoszillator 3 ist in diesem Beispiel auf die mittlere Betriebsfrequenz, d.h. auf die Soll-Resonanzfrequenzen  $f_s$  des Serienresonanzkreises und  $f_p$  des Parallelreso-

nanzkreises abgestimmt, die in der Regel als gleich angenommen werden können. Mit dieser Frequenz schwingt der Hochfrequenzgenerator an. Sobald jedoch eine der von den Verstärkern 16 und 17 aus dem Ausgangsstrom  $I_1$  oder der Ausgangsspannung  $U_1$  abgeleiteten Spannungen deutlich von Null verschieden ist, wird der elektronische Schalter 4 auf Selbsterregung, d.h. auf Rückkopplung umgeschaltet. Dies wird im vorliegenden Beispiel mit Hilfe der Gleichrichter 21 und 22 und der elektronischen ODER-Schaltung 6 bewerkstelligt.

Der Ausdruck "deutlich von Null verschieden" soll dabei so verstanden werden, daß die von den Verstärkern 16 und 17 aus dem Ausgangsstrom oder der Ausgangsspannung des Leistungsverstärkers 1 abgeleiteten Spannungen zur Ansteuerung des Leistungsverstärkers 1 ausreichen müssen. Wegen der hohen möglichen Schleifenverstärkungen sind dafür aber relativ kleine Spannungswerte ausreichend.

Die Schwellen der ODER-Schaltung 6 sind also so eingestellt, daß ihr Ausgangssignal umspringt, wenn die jeweilige Eingangsspannung eine für die Ansteuerung des Leistungsverstärkers 1 ausreichende Amplitude signalisiert.

Der elektronische Auswahlwähler 7 soll den Rückkopplungszweig erfindungsgemäß auf Stromrückkopplung schalten, wenn die Lastimpedanz den charakteristischen Wert unterschreitet, und auf Spannungsrückkopplung, wenn die Lastimpedanz den charakteristischen Wert überschreitet. Dazu ist in dem Beispiel der Fig. 2 ein weiterer Zweig aus einem Stromwandler 23, einem Verstärker 24, einem Gleichrichter 25 und einem Komparator 26 vorgesehen. Mit dem Stromwandler 23 wird ein dem Laststrom  $I_2$  proportionales Signal abgegriffen, das mit dem Verstärker 24 in der Amplitude angepaßt und im Gleichrichter 25 gleichgerichtet wird. Danach wird es vom Komparator 26 mit dem Ausgangssignal des Gleichrichters 22 verglichen. Die Verstärkungen  $v_{12}$  des Verstärkers 17 und  $v_{12}$  des Verstärkers 24 sind dabei so eingestellt, daß das Ausgangssignal des Komparators 26 dann umspringt, wenn die Lastimpedanz den charakteristischen Wert durchläuft. Um dauerndes Umspringen des Komparators 26 zu vermeiden, wenn sich die Lastimpedanz längere Zeit genau auf dem Wert der charakteristischen Impedanz befindet, ist der Komparator 26 in diesem Beispiel mit einer Hysterese versehen.

In Fig. 2 ist weiterhin die Ansteuerung der Phasenregelschleife für den Hilfsoszillator 3 ausführlicher dargestellt. Der Hilfsoszillator 3 muß immer dann frei schwingen, wenn der Hochfrequenzgenerator entweder keine Leistung abgibt oder sich im Anschwingen befindet. Die Phasensynchronisation muß dagegen eingeschaltet werden, wenn der Hochfrequenzgenerator mit Spannungsrückkopplung oder Stromrückkopplung arbeitet. Aus diesem Grund wird im Beispiel der Fig. 2 das Ausgangssignal der ODER-Schaltung 6 mit Hilfe eines UND-Gliedes noch mit dem Aktivierungssignal des Einschalters 18 verknüpft. Damit wird der Halteverstärker 14 der Phasenregelschleife nur zu den beschriebenen Zeiten durchgeschaltet.

Außerdem wird in Fig. 2 noch beispielhaft die unterschiedliche Behandlung der Leistungsregelung für Schneiden und Koagulieren gezeigt. Beim Schneiden soll die Leistungsregelung so erfolgen, daß die Schlagweite des Lichtbogens zwischen der Chirurgiesonde und dem Gewebe konstant ist. Dies ist dann erfüllt, wenn die Amplituden der vom Lichtbogen erzeugten

harmonischen Ströme oder Spannungen auf einen konstanten Wert geregelt werden. Dazu wird in diesem Beispiel das Ausgangssignal des phasengesteuerten Gleichrichters 10 mit einem Tiefpaß 28 gefiltert und einem Regelverstärker 29 zugeführt. Der Regelverstärker 29 vergleicht dieses Signal mit einer Vergleichsspannung, die von einem Sollwertgeber 30 geliefert wird und führt das verstärkte Differenzsignal dem Modulator 2 zu. Damit ist die Regelschleife für die Leistungsregelung geschlossen. Mit dem Sollwertgeber 30 kann nun die gewünschte Schlagweite des Lichtbogens zwischen der Chirurgiesonde und dem Gewebe, d.h. die gewünschte Schneidwirkung eingestellt werden. Der Hochfrequenzgenerator gibt dann in jedem Zeitmoment genau soviel Leistung ab, wie für die gewünschte Schneidwirkung gerade benötigt wird.

Beim Koagulieren soll kein Lichtbogen auftreten, weil sonst wieder Schneidwirkung einsetzen kann. Beim Koagulieren wird daher die Regelschleife von der Aktivierungsschaltung 19 entsprechend umgeschaltet. Sie kann entweder ganz außer Betrieb gesetzt werden, wobei die Aktivierungsschaltung 19 dann den Schalter 18 in der Regel im Pulsbetrieb aktiviert. Dem Fachmann sind aber auch Lösungen bekannt, bei denen der Regelverstärker 29 im Koagulationsbetrieb auf Lichtbogenerkennung umgeschaltet wird und dieser den Hochfrequenzgenerator über den Modulator 2 für eine bestimmte Zeitdauer abschaltet, sobald über das Entstehen harmonischer Frequenzen das Auftreten eines Lichtbogens erkannt wird.

Bei Hochfrequenzgeneratoren nach der Erfindung arbeitet der Leistungsverstärker 1 im Schaltbetrieb. Da die Verstärkerelemente des Leistungsverstärkers 1 bei diesem Betrieb abwechselnd extrem hochohmig und extrem niederohmig sind, hat die Ausgangsspannung  $U_1$  eine vernachlässigbar kleine Phasenverschiebung gegenüber der Steuerspannung des Leistungsverstärkers 1. Bei Stromrückkopplung wird die Steuerspannung aus dem Ausgangsstrom  $I_1$  des Leistungsverstärkers 1 gewonnen. Achtet man darauf, daß die Phasenverschiebung im Strom-Rückkopplungsweig sehr gering ist, so hat man im Fall der Stromrückkopplung extrem geringe Phasenverschiebung zwischen Ausgangsstrom  $I_1$  und Ausgangsspannung  $U_1$ . Die Frequenz stellt sich dabei automatisch so ein, daß diese Bedingung erfüllt ist. Es handelt sich hierbei vornehmlich um die aktuelle Resonanzfrequenz des Serienresonanzkreises. Veränderungen der Bauelemente  $L_p$  und  $C_p$  sowie Verstimmungen durch die Blindelemente der Lastimpedanz und Verstimmungen des Parallelresonanzkreises werden dabei automatisch berücksichtigt. Die Stromrückkopplung ergibt also geringstmögliche Verluste in den Verstärkerelementen des Leistungsverstärkers 1 und damit höchstmöglichen Wirkungsgrad, kleinste Überschwinger und sichersten Betrieb. Für die gewünschten Wirkungen der Hochfrequenzleistung spielen die dabei auftretenden geringen Frequenzverschiebungen u.a. keine Rolle wie bereits früher beschrieben wurde.

Trotzdem ist es vorteilhaft, auf Spannungsrückkopplung umzuschalten, wenn die Lastimpedanz die charakteristische Impedanz  $R_c$  überschreitet. Dies soll mit Hilfe der Fig. 3 näher erläutert werden. Fig. 3 zeigt die Ortskurven der vom Leistungsverstärker 1 gesehenen Eingangsimpedanz des Ausgangsfilters für vier verschiedene Werte der Lastimpedanz. Der Einfachheit halber sind hier für die Lastimpedanz nur reelle Werte  $R_{Last}$  angenommen. Das Beispiel ist für einen Fall gezeichnet, bei dem

$$\sqrt{L_p C_p} = 1 \text{ kOhm}$$

gilt. Da die Resonanzfrequenzen  $f_s$  des Serienresonanzkreises und  $f_p$  des Parallelresonanzkreises nominell gleich sind, gilt

$$L_s \cdot C_s = L_p \cdot C_p$$

und damit auch

$$\sqrt{L_p C_s} = 1 \text{ kOhm}$$

Die charakteristische Impedanz  $R_c$  wäre in diesem Beispiel also 1 kOhm. Die vier Ortskurven in Fig. 3 sind für die Lastimpedanzen 0.2 kOhm, 1 kOhm, 1.2 kOhm und 3 kOhm gezeichnet. Jede Ortskurve hat bei der Resonanzfrequenz des Serienresonanzkreises und des Parallelresonanzkreises einen Schnittpunkt mit der reellen Achse. Diese Frequenz ist in Fig. 3 jeweils als die gewünschte Betriebsfrequenz  $f_B$  bezeichnet. Wenn die Lastimpedanz den Wert der charakteristischen Impedanz allerdings übersteigt, so bildet die Ortskurve der Eingangsimpedanz eine Schleife mit zwei weiteren Schnittpunkten mit der reellen Achse. Bei Stromrückkopplung würde der Hochfrequenzgenerator nun nicht mehr die gewünschte Betriebsfrequenz  $f_B$ , sondern eine der beiden anderen Frequenzen mit reeller Eingangsimpedanz einstellen. Bei dieser Frequenz fließen hohe Blindströme durch die Verstärkerelemente des Leistungsverstärkers, die verfügbare Leistung und der Wirkungsgrad nehmen rapide ab. Dafür steigt die Verlustleistung in den Verstärkerelementen des Leistungsverstärkers und die Betriebssicherheit ist gefährdet. Bei geringfügigen Überschreitungen der charakteristischen Impedanz ist dieser Effekt noch nicht sehr ausgeprägt, wie die Ortskurve für  $R_{Last} = 1.2 \text{ kOhm}$  zeigt. Deshalb sind gewisse Toleranzen für die Umschaltsschwelle zugelassen.

Bei hochohmigen Lastimpedanzen, verglichen mit der charakteristischen Impedanz, bringt eine erfindungsgemäße Umschaltung der Rückkopplung auf Spannungsrückkopplung den Hochfrequenzgenerator wieder auf die gewünschte Betriebsfrequenz  $f_B$  zurück. Dies bringt erhebliche Vorteile hinsichtlich der Verlustleistung, des Wirkungsgrades, der verfügbaren Leistung und der Betriebssicherheit.

Bei einem niederohmigen Leistungsverstärker ist Spannungsrückkopplung grundsätzlich problematisch. Aus diesem Grund wird mit der Erfindung vorgeschlagen, die Rückkopplungsspannung aus der Spannung am Parallelresonanzkreis, also hinter dem Serienresonanzkreis zu gewinnen. In allen praktischen Fällen übernimmt dann weiterhin der Serienresonanzkreis die Frequenzführung, d.h. nach der Umschaltung zwischen Strom- und Spannungsrückkopplung schwingt der Hochfrequenzgenerator praktisch mit der gleichen Frequenz weiter.

Es ist weiterhin einleuchtend, daß Fehlableiche der Resonanzkreise sowie Änderungen der Bauelementewerte bei Alterung über den von der Rückkopplung automatisch durchgeführten Frequenzabgleich weitestgehend ausgeglichen werden.

#### Patentansprüche

1. Automatisch leistungsgeregelter Hochfrequenzgenerator für die Hochfrequenz-Chirurgie mit einem im Schaltbetrieb arbeitenden Leistungsver-



stärker zur Erzeugung der notwendigen Hochfrequenzleistung, einer Modulationseinrichtung zur Regelung der Ausgangsamplitude, einem Ausgangsfilter zur Unterdrückung anderer Frequenzen als der Generatorfrequenz des Hochfrequenzgenerators, einer Harmonischen-Meßeinrichtung zur Messung der zur Generatorfrequenz harmonischen Frequenzen, die von dem zwischen der Chirurgiesonde und dem zu schneidenden oder zu koagulierenden Gewebe entstehenden Lichtbogen erzeugt werden, dadurch gekennzeichnet, daß

- a) das Ausgangsfilter (5) einen ungefähr auf die mittlere Betriebsfrequenz abgestimmten in Serie geschalteten Serienresonanzkreis ( $L_s, C_s$ ) und einen ungefähr auf die mittlere Betriebsfrequenz abgestimmten parallel geschalteten Parallelresonanzkreis ( $L_p, C_p$ ) enthält, wobei der Serienresonanzkreis ( $L_s, C_s$ ) vom Leistungsverstärker (1) aus gesehen das erste Filterelement darstellt,
- b) die Ansteuerung des Leistungsverstärkers (1) im Moment des Anschwingens von einem Hilfsoszillator (3) erfolgt,
- c) die Ansteuerung des Leistungsverstärkers (1) nach dem Anschwingen, d.h. wenn im Ausgangskreis des Leistungsverstärkers (1) entweder ein von Null deutlich unterschiedlicher Strom ( $I_1$ ) fließt oder eine von Null deutlich unterschiedliche Spannung ( $U_1$ ) herrscht, auf Selbsterregung, d.h. Rückkopplung aus dem Ausgangskreis des Leistungsverstärkers (1) umgeschaltet wird, wobei dann die Ansteuerungsspannung des Leistungsverstärkers
  - über ein Wandlerglied (15 und 16) und Impulsformerstufen (20) aus dem den Serienresonanzkreis ( $L_s, C_s$ ) durchfließenden Strom ( $I_1$ ) gewonnen wird, wodurch Stromrückkopplung entsteht, wenn der Betrag der an den Hochfrequenzgenerator angeschlossenen Lastimpedanz ( $Z_{Last}$ ) einen charakteristischen, voreingestellten Wert ( $R_c$ ) unterschreitet
  - über ein Wandlerglied (17) und Impulsformerstufen (20) aus der am Parallelresonanzkreis ( $L_p, C_p$ ) anliegenden Spannung ( $U_1$ ) gewonnen wird, wodurch Spannungsrückkopplung entsteht, wenn der Betrag der an den Hochfrequenzgenerator angeschlossenen Lastimpedanz ( $Z_{Last}$ ) einen charakteristischen, voreingestellten Wert ( $R_c$ ) überschreitet

wobei ein elektronischer Schalter (7) für die Umschaltung zwischen diesen beiden Möglichkeiten der Rückkopplung vorgesehen ist, der bei schwankenden Lastimpedanzen ( $Z_{Last}$ ) auch während des Betriebes die beschriebene Umschaltung zwischen Strom- und Spannungsrückkopplung vornimmt, wenn der Betrag der Lastimpedanz ( $Z_{Last}$ ) den charakteristischen, voreingestellten Wert ( $R_c$ ) über- oder unterschreitet,

- d) die Frequenz des Hilfsoszillators (3) mit elektronischen Mitteln verstellbar ist, wobei eine phasengesteuerte Schaltung (13) vorhanden ist, die die Frequenz des Hilfsoszillators (3) während des Rückkopplungsbetriebes auf die Generatorfrequenz synchronisiert, und eine Halteschaltung (14) vorhanden ist, die die Fre-

quenz des Hilfsoszillators während der Betriebspausen des Hochfrequenzgenerators und während des Anschwingens auf der letzten während des Rückkopplungsbetriebes eingestellten Frequenz hält und

- e) die Harmonischen-Meßeinrichtung einen phasengesteuerten Gleichrichter (10) enthält, dessen Steuersignal aus der momentanen Frequenz des Hilfsoszillators (3) abgeleitet ist und der eine der im Frequenzgemisch am Ausgang des Hochfrequenzgenerators enthaltene harmonische Frequenz gleichrichtet, und das Ausgangssignal der Harmonischen-Meßeinrichtung dem Modulator (2) als Regelsignal zur Regelung der Ausgangsamplitude des Hochfrequenzgenerators zugeführt ist.

2. Automatisch leistungsgeregelter Hochfrequenzgenerator nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der charakteristische Wert ( $R_c$ ) der Lastimpedanz ( $Z_{Last}$ ), bei dessen Unter- oder Überschreitung auf Strom- oder Spannungsrückkopplung umgeschaltet wird, ungefähr der Gleichung

$$R_c = \sqrt{L_s C_p}$$

entspricht, wenn  $L_s$  die Induktivität des Serienresonanzkreises und  $C_p$  die Kapazität des Parallelresonanzkreises ist.

3. Automatisch leistungsgeregelter Hochfrequenzgenerator nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Induktivität ( $L_p$ ) des Parallelresonanzkreises als Übertrager zur Transformation der an den Hochfrequenzgenerator angeschlossenen Lastimpedanz ( $Z_{Last}$ ) nach an sich bekannten Regeln ausgebildet ist, die Kapazität ( $C_p$ ) des Parallelkreises der Primärseite, d.h. der dem Leistungsverstärker (1) zugewandten Seite dieses Übertragers parallel geschaltet ist und die Umschaltung der Rückkopplung auf Spannungs- oder Stromrückkopplung erfolgt, wenn die Lastimpedanz ( $Z_{Last}$ ) einen charakteristischen Wert ( $R_c$ ) über- oder unterschreitet der ungefähr der Gleichung

$$R_c = \bar{u}^2 \cdot \sqrt{L_s C_p}$$

entspricht, wenn  $\bar{u}$  das Übersetzungsverhältnis des Übertragers (13) ist.

4. Automatisch leistungsgeregelter Hochfrequenzgenerator nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Induktivität ( $L_p$ ) des Parallelresonanzkreises als Übertrager zur Transformation der an den Hochfrequenzgenerator angeschlossenen Lastimpedanz ( $Z_{Last}$ ) nach an sich bekannten Regeln ausgebildet ist, die Kapazität des Parallelkreises der Sekundärseite, d.h. der dem Leistungsverstärker abgewandten Seite dieses Übertragers parallel geschaltet ist und die Umschaltung der Rückkopplung auf Spannungs- oder Stromrückkopplung erfolgt, wenn die Lastimpedanz ( $Z_{Last}$ ) einen charakteristischen Wert ( $R_c$ ) über- oder unterschreitet der ungefähr der Gleichung

$$R_c = \bar{u} \cdot \sqrt{L_s C_p}$$

entspricht, wenn  $\bar{u}$  das Übersetzungsverhältnis des Übertragers ist.

5. Automatisch leistungsgeregelter Hochfrequenzgenerator nach den Ansprüchen 1 bis 4, dadurch

gekennzeichnet, daß

- a) eine Meßanordnung (17 und 22) zur Erfassung der Ausgangsspannung ( $U_2$ ) des Hochfrequenzgenerators oder einer dazu proportionalen Größe vorhanden ist,
- b) eine Meßanordnung (24 und 25) zur Erfassung des Ausgangsstromes ( $I_2$ ) des Hochfrequenzgenerators oder einer dazu proportionalen Größe vorhanden ist,
- c) die Meßfaktoren ( $v_{U2}$  und  $v_{I2}$ ) der beiden Meßanordnungen (17, 22, 24 und 25) so voreingestellt sind, daß ihre Ausgangssignale ungefähr dann gleich sind, wenn die an den Hochfrequenzgenerator angeschlossene Impedanz ( $Z_{Last}$ ) den charakteristischen Wert ( $R_c$ ) hat und
- d) eine Komparatorschaltung (26) vorhanden ist, die die Ausgangssignale der beiden vorher beschriebenen Meßanordnungen (17, 22, 24 und 25) miteinander vergleicht, und das Ausgangssignal der Komparatorschaltung (26) die Umschaltung zwischen Spannungs- und Stromrückkopplung im Rückkopplungszweig des Hochfrequenzgenerators steuert.

6. Automatisch leistungsgeregelter Hochfrequenzgenerator nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß die Meßanordnung zur Erfassung der Ausgangsspannung ( $U_2$ ) des Hochfrequenzgenerators eine zur Ausgangsspannung ( $U_2$ ) proportionale Größe durch Messung der Versorgungsspannung ( $U_B$ ) des Leistungsverstärkers (1) erfaßt.

7. Automatisch leistungsgeregelter Hochfrequenzgenerator nach den Ansprüchen 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß eine Meßanordnung (24 und 25) zur Erfassung des Ausgangsstromes ( $I_2$ ) des Hochfrequenzgenerators oder einer dazu proportionalen Größe vorhanden ist, und eine Komparatorschaltung (26) vorhanden ist, die das Ausgangssignal dieser Meßanordnung (24 und 25) mit einem Sollwert vergleicht, und das Ausgangssignal der Komparatorschaltung (26) die Umschaltung zwischen Spannungs- und Stromrückkopplung im Rückkopplungszweig des Hochfrequenzgenerators steuert, wobei der Sollwert so eingestellt ist, daß die Umschaltung zwischen Spannungs- und Stromrückkopplung ungefähr beim charakteristischen Wert ( $R_c$ ) der Lastimpedanz ( $Z_{Last}$ ) erfolgt.

8. Automatisch leistungsgeregelter Hochfrequenzgenerator nach den Ansprüchen 5 bis 7, dadurch gekennzeichnet, daß die Komparatorschaltung (26) eine Hysterese aufweist.

9. Automatisch leistungsgeregelter Hochfrequenzgenerator nach den Ansprüchen 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, daß der Hilfsoszillator (3) bis zur ersten Aktivierung des Hochfrequenzgenerators eine Frequenz abgibt, die der mittleren Betriebsfrequenz des Hochfrequenzgenerators entspricht.

10. Automatisch leistungsgeregelter Hochfrequenzgenerator nach den Ansprüchen 1 bis 9, dadurch gekennzeichnet, daß der Hilfsoszillator (3) einen elektronisch abstimmbaren Oszillator (11) enthält, der auf der  $n$ -fachen Generatorfrequenz schwingt, und einen  $n:1$ -Frequenzteiler (12), der vom Oszillator (11) angesteuert wird, und an dessen Ausgang die Generatorfrequenz entsteht, wobei  $n$  die Ordnungszahl der von der Harmonischen-Meßeinrichtung gleichzurichtenden höheren Harmonischen ist.

11. Automatisch leistungsgeregelter Hochfrequenzgenerator nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, daß der Oszillator (11) auf der 3fachen Generatorfrequenz schwingt, und die 3fache Harmonische von der Harmonischen-Meßeinrichtung gleichgerichtet wird.

---

Hierzu 3 Seite(n) Zeichnungen

---

— Leerseite —

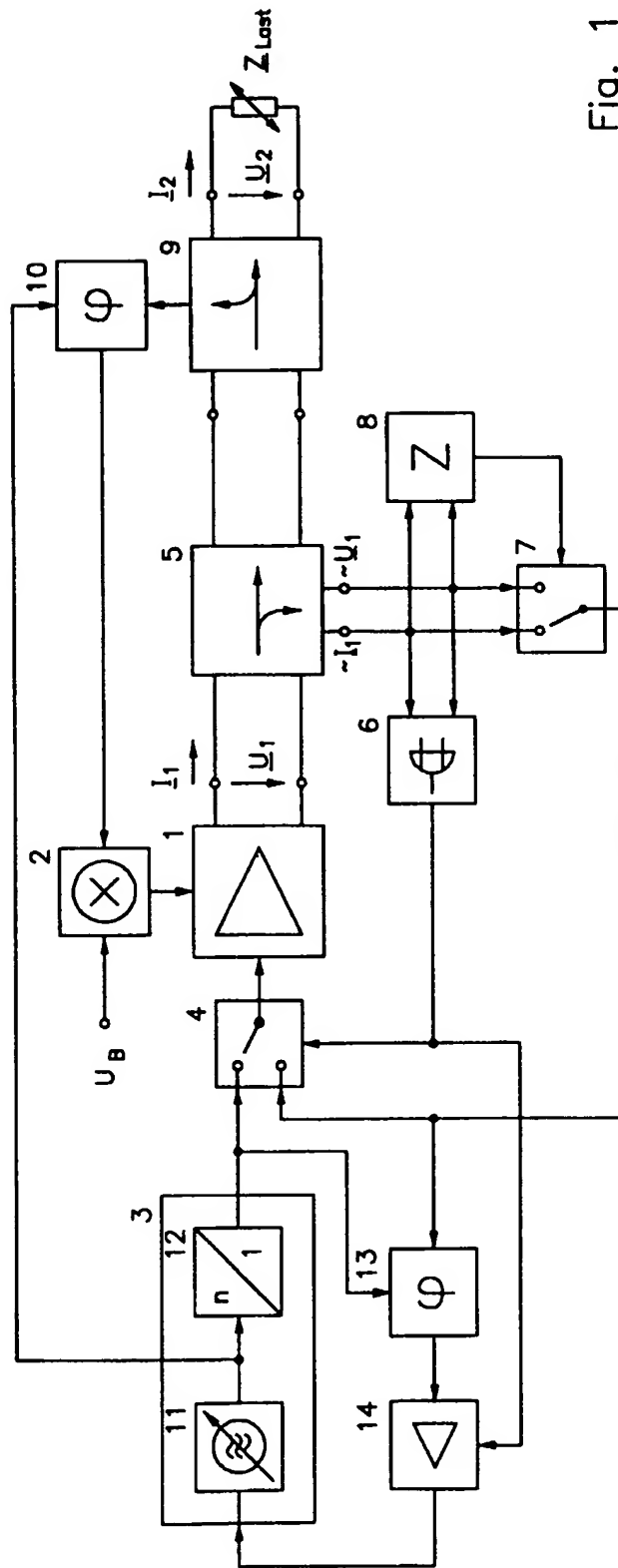


Fig. 1

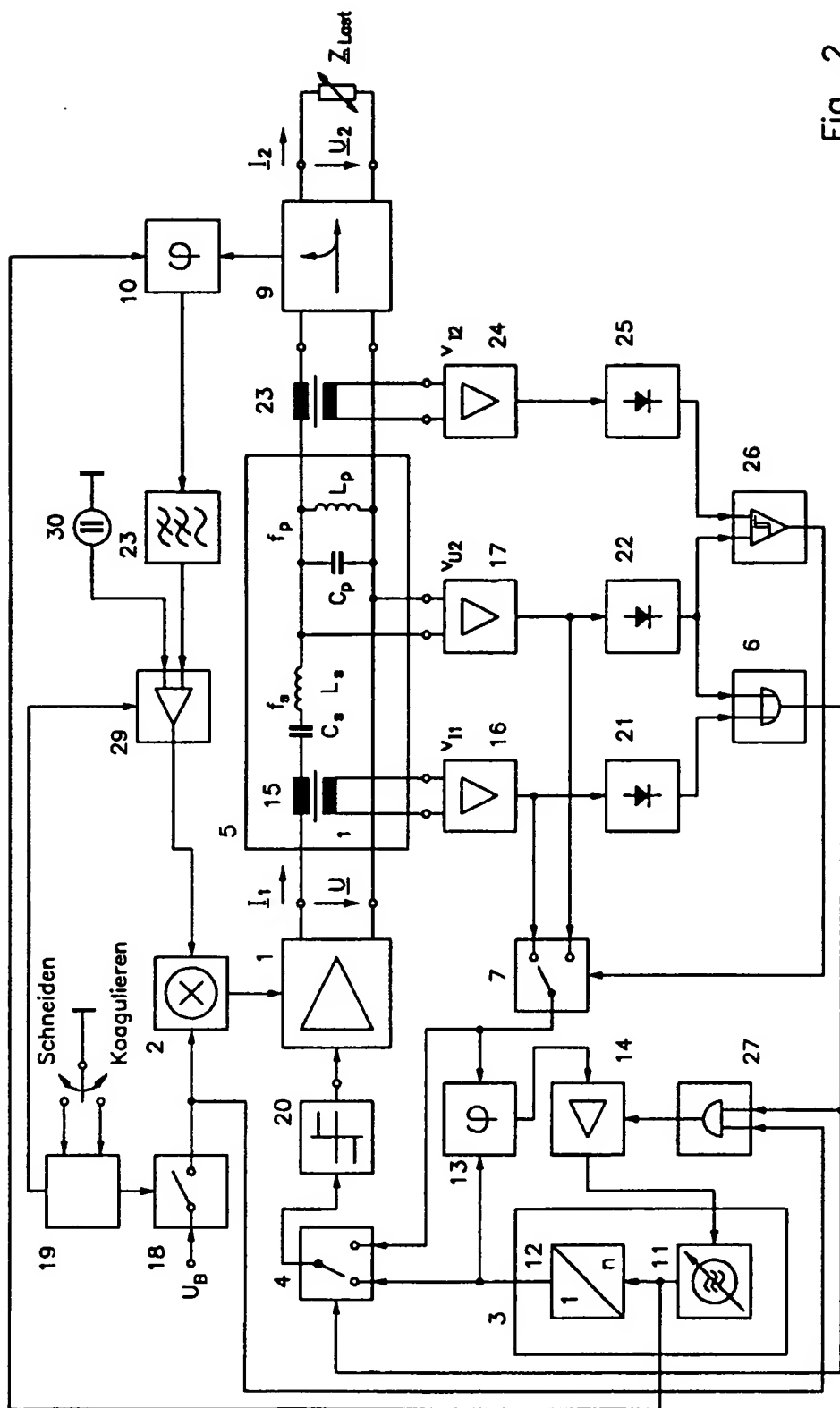


Fig. 2



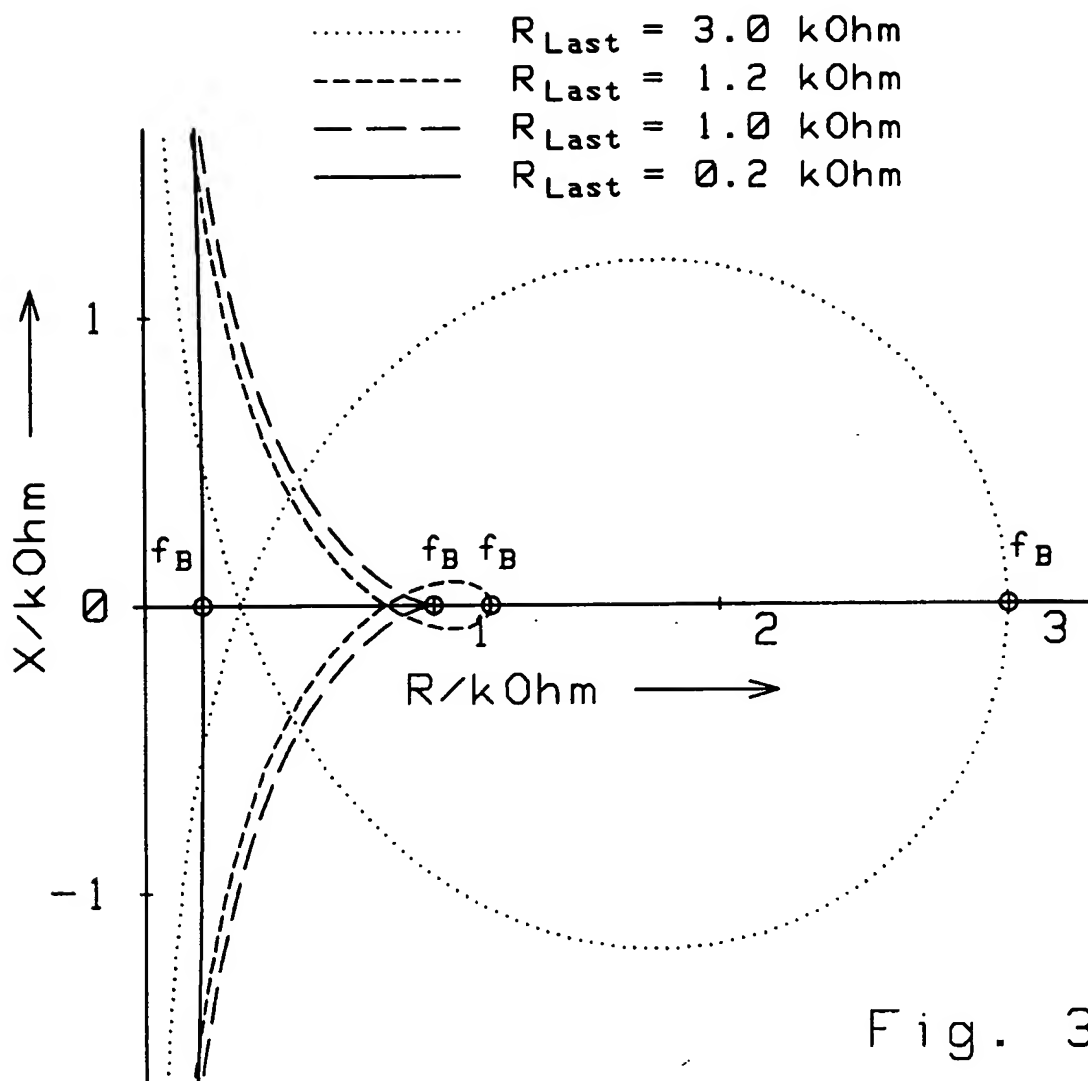


Fig. 3